

## **3D tištěný animatronický model srdce**

3D Printed Animatronic Heart

**Vít Bumba**

## Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem a výrobou animatronického modelu lidského srdce. Tento model může být použit jako učební pomůcka, při simulování srdečního cyklu a patologií. Je zaměřena především na výrobu metodou 3D tisku. Cílem práce je výroba mechanismu zprostředkovávající pohyb a elastického obalu, který bude představovat povrch srdce. Součástí práce je také návrh a realizace elektronického obvodu, který bude sloužit k řízení modelu a zpracování impulsu kardiostimulátoru.

## Klíčová slova

Model, Srdce, Srdeční cyklus, 3D tisk, Servomotor, Odlévání, Modelování, Arduino, ESP-32, Plošný spoj, Programování, Kardiostimulátor.

## Abstract

This bachelor thesis deals with design and construction of animatronic human heart model. This model can be used as learning tool for simulation of cardiac cycle and pathologies. This thesis is focused on 3D printing manufacturing method. The aim of the thesis is to produce mechanism that arrange moving and elastic cover that simulates heart surface. A part of the thesis is to design and implement electronic circuit that will control the heart model pulsation and triggers by pacemaker's impulse.

## Key words

Model, Cardiac cycle, 3D print, Servomotor, Casting, Modeling, Arduino, ESP-32, Printed circuit board, Programming, Pacemaker

# Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Danielovi Barvíkovi za konzultace a cenné rady při zpracování modelu. Rovněž děkuji firmě Schneider Construction s. r. o. za zapůjčení 3D tiskárny Prusa i3 MK3, dodání tiskového filamentu, lukoprenu S 9780 a dalšího materiálu k výrobě. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinovi Dostálovi za zapůjčení soustruhu. V neposlední řadě děkuji mému blízkému okolí za podporu.

# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek.....	5
Seznam obrázků .....	6
1. Úvod .....	7
2. Pohybový mechanismus .....	8
2. 1. První typ pohybového mechanismu .....	8
2. 2. Druhý typ pohybového mechanismu .....	11
2. 3. Finální typ pohybového mechanismu .....	13
3. Elastický obal .....	17
3. 1. Tisk elastického obalu z pružného materiálu .....	17
3. 2. Výroba lukoprenového odlitku pomocí lukoprenové formy .....	18
3. 3. Výroba elastického obalu z tekutého latexu .....	21
3. 4. Lukoprenový obal vyrobený pomocí sádrové formy .....	22
4. Elektronika a řízení .....	25
4. 1. Zdroj napětí .....	25
4. 2. Zapojení servomotorů a modulu ESP-32 .....	26
4. 3. Simulace impulsu kardiostimulátoru pomocí tlačítka .....	26
4. 4. Návrh řídicí a napájecí jednotky .....	27
4. 5. Kompletace a testování řídicí a napájecí jednotky .....	30
4. 6. Řízení modelu srdce .....	32
5. Stojánek .....	33
5. 1. Tištěný stojánek.....	33
5. 2. Nerezový stojánek .....	34
Závěr .....	36
Literatura .....	37

# Seznam použitých symbolů a zkratek

mm	- milimetr
M	- metrický závit
3D	- trojdimenzionální
PLA	- poly Lactic Acid
ABS	- akrylonitril-butadien-styren
V	- volt
A	- ampér
$\Omega$	- ohm
k $\Omega$	- kiloohm
M $\Omega$	- megaohm
$\mu$ F	- mikrofarad
nF	- nanofarad
pF	- pikofarad
MB	- megabyte
JR	- typ konektoru
A/D	- analog/digital
USB	- universal Serial Bus
TTL	- transistor-transistor-logic
RXD0	- označení pinu pro příjem dat modulu ESP-32
TXD0	- označení pinu pro vysílání dat modulu ESP-32
RXD	- označení pinu pro příjem dat převodníku
TXD	- označení pinu pro vysílání dat převodníku
EO	- označení resetovacího pinu modulu ESP-32
EN	- reset
IO0	- označení bootovacího pinu modulu ESP-32
%	- procenta

# Seznam obrázků

- Obrázek 1: Návrh středové části jako jednoho celku
- Obrázek 2: Tisk na tiskárně Průša i3 MK3
- Obrázek 3: Výroba závitů
- Obrázek 4: První typ pohybového mechanismu
- Obrázek 5: Celoplošné síně se středovým žebrem
- Obrázek 6: Úložný prostor středové části
- Obrázek 7: Přenos pohybu pomocí páky a spojnice
- Obrázek 8: Soustružení pojistné hřídele
- Obrázek 9: Sestavený finální typ pohybového mechanismu
- Obrázek 10: Vytvrtené díry při posouvání držáku
- Obrázek 11: Vytištěná část z materiálu TPE 88
- Obrázek 12: Polystyrénové těleso s dřevěným prkénkem
- Obrázek 13: Vymodelované srdce z modelíny
- Obrázek 14: Vnitřní povrch lukoprenové formy
- Obrázek 15: Odlitek po rozebrání formy
- Obrázek 16: Obal srdce vyrobený z tekutého latexu
- Obrázek 17: Sádrové formy
- Obrázek 18: Nanášení lukoprenu na formu
- Obrázek 19: Finální lepení obalu
- Obrázek 20: Držák s Li-ion akumulátory
- Obrázek 21: Zapojení vývojové desky ESP-32 se spínačem
- Obrázek 22: Blokové schéma řídicí a napájecí jednotky
- Obrázek 23: Schéma zapojení 5 V regulátoru
- Obrázek 24: Schéma zapojení 3,3 V regulátoru
- Obrázek 25: Schéma zapojení modulu ESP-32
- Obrázek 26: Schéma zapojení vstupního obvodu kardiostimulátoru
- Obrázek 27: Navržená deska plošného spoje horní a spodní strana
- Obrázek 28: Sestavený plošný spoj
- Obrázek 29: Namontovaná řídicí deska s příslušnou kabeláží
- Obrázek 30: Připojení pomocí USB / TTL převodníku
- Obrázek 31: Připojení k tištěnému stojánku
- Obrázek 32: Gravírování
- Obrázek 33: Model s nerezovým stojánkem

# 1. Úvod

Srdce je jedním z nejdůležitějších orgánů nacházejících se v lidském těle. Jedná se o svalový orgán, který pohání celý cévní systém. Je rozděleno na čtyři dutiny, a to dvě síně a dvě komory. Přijímá neokysličenou krev z velkého (tělního) oběhu a tu pod tlakem předává malému (plicnímu) oběhu. Poté okysličenou krev přivádí zpět do tělního oběhu. Udává se, že lidské srdce je přibližně velké jako pěst člověka. Nachází se v dutině hrudní mezi plícemi za kostí hrudní [1]. Průměrná tepová frekvence se pohybuje okolo 72 tepů za minutu, ale při zvýšené námaze může dosáhnout až frekvence 150 tepů. Za den lidským srdcem projde okolo 8000 litrů krve. Bez srdce by tělo nemohlo fungovat. Často je srdce nazýváno jako motor či pumpa lidského těla [2].

O významu lidského srdce není důvod pochybovat. Tento orgán je všeobecně známý a na výuku týkající se srdeční problematiky je kladen velký důraz. Srdeční cyklus lze nejlépe vysvětlit na 3D modelech či animacích. Jako jedna z vyučovacích pomůcek, může sloužit také model konstruovaný v mé bakalářské práci.

Na tomto modelu může být simulován srdeční cyklus zdravého srdce, tepajícího v různých frekvencích. Další možností je znázornění nejrozumnějších patologických jevů. Můžeme simulovat fibrilaci či nefunkčnost jednotlivých síní a komor, nebo dokonce fibrilaci celého srdce. Model by měl také reagovat na stimulující impuls kardiostimulátoru a pohybovat se ve frekvenci, která je nastavena.

Při konstrukci a výrobě modelu je využito několik výrobních technologií a postupů, které jsou v práci popsány. Většina komponentů pohyblivé části je vyrobena 3D tiskem. Dalšími výrobními technologiemi jsou například odlévání, strojní obrábění či pájení.

Problematika první části bakalářské práce se týká návrhu a konstrukce systému, který zprostředkovává pohyb celého modelu, jeho oporu a možnosti uložení všech komponentů. Velmi důležitý je výběr tiskového materiálu, pohonu a principu, pomocí kterého je přenášen mechanický pohyb. V další části je navržen a vyráběn pružný obal, který tvoří povrch modelu srdce. Po nasazení na pohyblivou část by měl simulovat srdeční pohyby. Model by měl svým vzhledem připomínat vzhled reálného lidského srdce. V následující části je řešena problematika napájení a řízení pohybu modelu. Po návrhu obvodu a výrobě plošného spoje je model naprogramován tak, aby vykazoval požadované pohyby. Nakonec je řešeno uložení modelu a jeho prezentace.

Hotový model je odzkoušen a ověřena jeho funkčnost včetně interakce na impuls kardiostimulátoru.

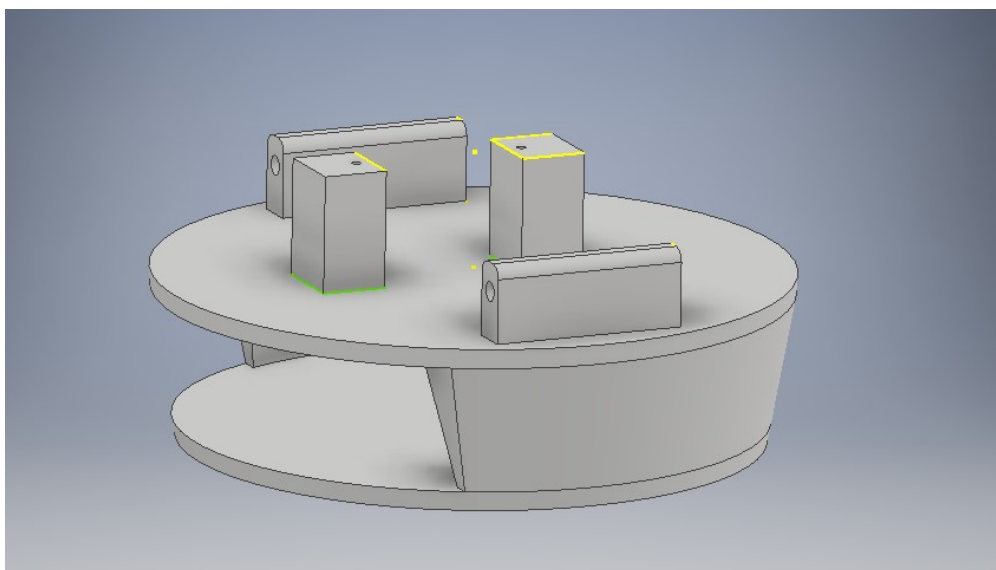
## 2. Pohybový mechanismus

Hned na začátek, bude popsána konstrukce a výroba pohybového mechanismu. Pohybový mechanismus je hlavní částí modelu srdce. Hned při prvotním návrhu bylo rozhodnuto, že se bude skládat z pěti primárních částí, a to středové části a čtyř pohyblivých klapek, které budou simulovat síně a komory. Celková výška pohybového mechanismu je 160 mm.

Ve středu vznikne prostor, který bude sloužit k uložení řídicí jednotky, zdroje a příslušné kabeláže. Na horní a spodní straně středové části je plocha, ze které vystupují držáky servomotorů. Na této ploše jsou také situovány závěsy obou síní a na protější straně závěsy komor. Středová část také slouží k přichycení ke stojánku.

### 2. 1. První typ pohybového mechanismu

Celý pohybový mechanismus byl konstruován v programu Autodesk Inventor Professional 2018. Při vývoji první verze středové části bylo směřováno k tisku této části jako jednoho celku (Obrázek 1). V tomto případě prvky, nacházející se nad sebou, vyžadují mít během tisku vytvořeny mezi sebou podpěry, které zabraňují zborcení modelu. Po tisku se tyto podpěry od hotového výrobku odstraní odlomením, či odřezáním. Při odstranění podpěr často vznikají otřepy, či nečisté hrany, které se musí zabrousit pilníkem, nebo zarovnat nožem. Ačkoli jsou tiskové podpěry tištěny pouze s malou výplní, výrazně prodlužují dobu tisku a dochází k velké spotřebě materiálu, který je po dokončení výtisku vyhozen. Další nevýhodou u tohoto řešení byla špatná manipulace s elektronickými komponenty uloženými ve středovém prostoru. Z těchto důvodů bylo od návrhu jednodílné středové části upuštěno.



Obrázek 1: Návrh středové části jako jednoho celku

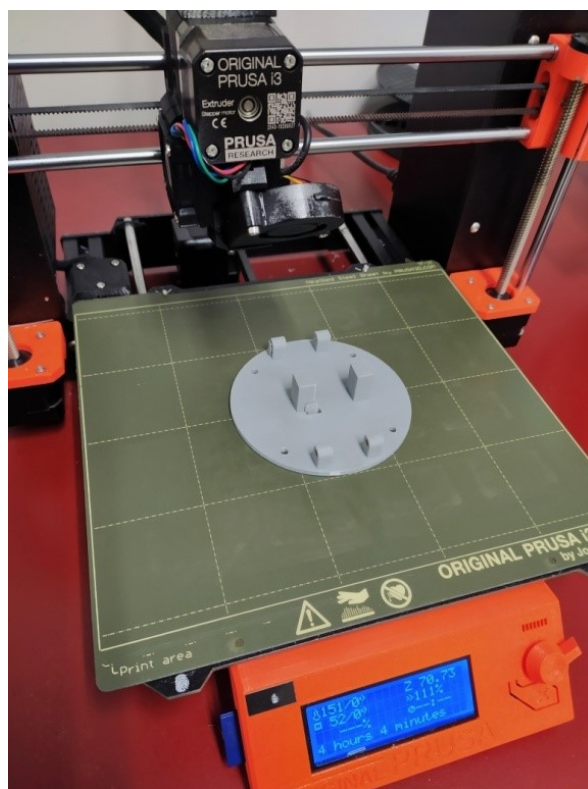


Jako lepší východisko se zdála středová část složená z horní a spodní desky o tloušťce 3mm. Horní deska má průměr 100 mm a spodní 950 mm. Kromě průměrů jsou obě desky shodné. V prostřední části desky se nachází dva bloky, do kterých bude přišroubovaný servomotor pomocí dvou křížových vrutů M2 x 10. Dále jsou na nich umístěny závěsy komor a síní válcového průřezu. Plánované spojení komory a síní bude pomocí hřídele o průměru 3 mm. Aby měla tato hřídel dostatečnou vůli a pohyb byl plynulý, byl zvolen průměr díry v závěsu 3,3 mm.

Desky jsou k sobě k sobě přichyceny čtyřmi šrouby. V horní desce jsou otvory o průměru 4,2 mm, jimiž snadno projde šroub M4 x 30, který obě desky spojuje. Válcové hlavy těchto imbusových šroubů se opírají o horní desku a nedovolí šroubu projít skrz materiál. V dolní desce jsou vytištěny díry o průměru 3,3 mm, což je doporučený průměr pro výrobu metrického závitu M4 [3]. Mezi horní a spodní desku jsou vloženy čtyři rozpěrky o délce 24 mm, které zajišťují přesnou vzdálenost obou desek. Tyto rozpěrky jsou na obou koncích rozšířené kvůli větší přitlačné ploše. Pro vedení kabeláže servomotorů jsou v obou deskách vytištěny obdélníkové díry.

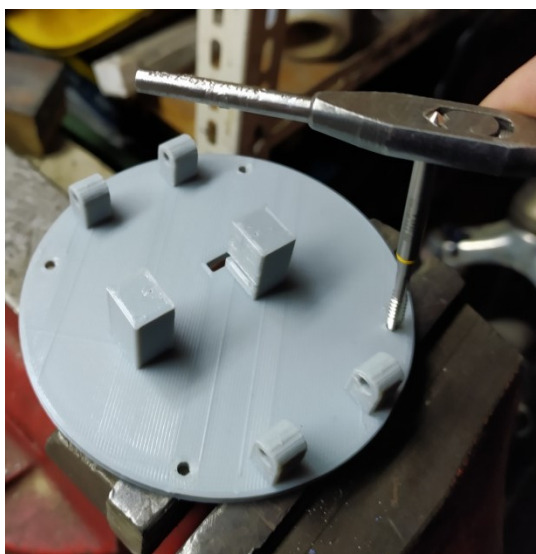
Materiálem k výrobě byl zvolený Poly Lactic Acid neboli PLA. Tento materiál se považuje společně s materiálem ABS (Akrylonitril-butadien-styren) za dva nejpoužívanější tiskové materiály. Oproti ABS má nižší teplotu, při které dochází k jeho tepelné deformaci, ale tento faktor u mého teplotně nezatěžovaného modelu nehraje žádnou roli. Naopak výhodou tohoto materiálu je snadný tisk a dostatečná pevnost [4].

Tisk proběhl na tiskárně Průša i3 MK3 (Obrázek 2). Všechny komponenty byly připraveny na tisk v programu PrusaSlicer 2. 3. 0., kde byla nastavená hustota výplně materiálu na 15% a jako struktura výplně byly zvoleny trojúhelníky. Tato výplň výrazně šetří materiál a trojúhelníková struktura dodává výrobku dostačující pevnost. Vyjma dutin válcových úchytů klapky se tento tisk obešel bez jakýchkoliv tiskových podpěr [5].



**Obrázek 2: Tisk na tiskárně Průša i3 MK3**

Po vytištění byly odstraněny tiskové podpěry, které vznikly v dutinách závěsů síní a komor, plochy po těchto podpěrách byly vyhlazeny jehlovým pilníkem a pomocí závitníku M4 byly vyrobeny závity ve spodní desce (Obrázek 3).



**Obrázek 3: Výroba závitů**

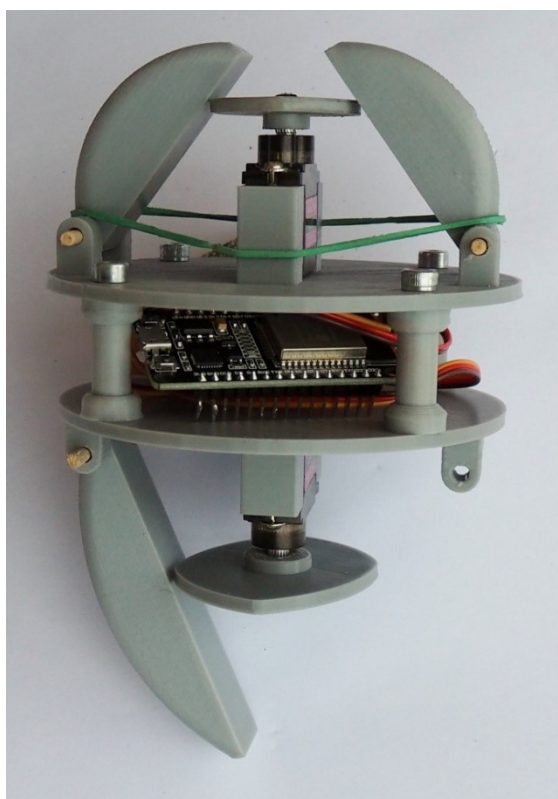
Při konstrukci mého modelu byla snaha o vyvinutí originálního a funkčního řešení přenášení pohybu servomotoru na síně a komory. Většina podobných animatronických modelů lidského srdce má přímočaré spojení servomotoru s pohyblivou částí. U prvního prototypu pohybového mechanismu modelu srdce je roztahování síní a komor zajištěno pomocí oboustranné vačky, která je nasazena na výstupní hřídel servomotoru s 360-ti stupňovou dráhou otáčení. Pomocí změn náběžných hran vačky, lze upravit roztahování síní a komor a chod celého srdce.

Mechanismus je osazen servomotory MG90S. Tento typ je jedním z nejrozšířenějších typů servomotorů používaných v mnoha odvětvích. Jejich hlavní výhodou jsou kovové převody. Tyto převody budou odolnější při větší zátěži servomotoru, během nesnadného roztahování obalu, ale také kvůli dlouhodobému zatěžování při provozu modelu. Jejich další neopomenutelnou výhodou jsou malé rozměry a dobrá adaptabilita k modelu. V tomto prvním typu mechanismu pohybu srdce je použita verze s 360-ti stupňovým oběhem [6].

Oboustranná vačka je také vytištěna z materiálu PLA. Poměr jejího náběhu a odklonu je prozatím dán 3:1, což znamená, že dochází k pomalému rozšíření síní, či komor a k jejich rychlému zpětnému stažení. Tento poměr lze později upravit a tím nasimulovat přesnější průběh srdeční činnosti. Jako největší problém vačky se stal tisícíhran, sloužící k nasazení na výstupní hřídel servomotoru. Tisícíhran o tak drobném průměru nebylo na tiskárně možné vytisknout. Tento problém byl vyřešen vytištěním otvoru menšího průměru než má výstupní ozubená hřídel. Poté byl střed vačky nahříván horkovzdušnou pistolí na teplotu, při které se začal materiál tavit, a vačka byla pomocí středového šroubu nasazena na hřídel. Po vychladnutí ve vačce zůstal otisknut tisícíhran výstupní hřídele.

Vačka byla nasazena na servomotor a přišroubována pomocí křížového šroubu M2 x 4. Na odzkoušení funkčnosti mechanismu byly vytištěny provizorní klapky představující síně a komory pŕlměsíčitého tvaru. Síně jsou délky 50 mm a komory jsou délky 750 mm. Na koncích těchto klapek jsou válcová oka, pro zavěšení ke středové části. Prozatím byly klapky do závěsů přichyceny pouze

pomocí dřevěné kulatiny, která bude později nahrazena kovovou hřídelí. Zpětný chod klapek bude zprostředkovávat stahování pružného obalu. Při zkouškách bez obalu byl nahrazen tenkou gumičkou, která nahrazovala samotný obal (Obrázek 4).



Obrázek 4: První typ pohybového mechanismu

## 2. 2. Druhý typ pohybového mechanismu

Na prvním typu pohyblivého mechanismu, byl odzkoušen navrhnutý princip pohybu a složení celého modelu. Bylo ale nutno tuto prozatímní konstrukci vylepšit do míry, při které může být plně použita k pohonu mého modelu a bude splňovat všechny požadavky jak mechanické, tak požadavek uložení zdroje a řídicí jednotky ve středové části mechanismu.

Největší úpravou prošly klapky simulující komory a síně. Jednou z problematik týkajících se síní a komor bylo zvolení jejich správného velikostního poměru. Každé lidské srdce je unikátní a těžko můžeme stanovit přesný poměr mezi těmito částmi. Dalším faktorem je, že klapky představující síně budou kromě horní části srdce pohybovat také s plánovanými arteriemi vymodelovanými na horní části srdce. V případě, že by byla zvolená podobná velikost klapek představující síně a komory, by po nasazení elastického obalu mohlo vypadat, že větší pohyblivá část je v oblasti síní, což je z fyziologického hlediska špatně. Nakonec byl poměr síní a komor zvolen v poměru 2:3 a zachovány stejné rozměry jaké byly u plochých síní a komor prvního typu.

Postup kreslení nových síní a komor byl složitější a síně a komory musely být více propracovány. Primárně bylo potřeba vytvořit elipsu, která odpovídala bokorysu síně. Elipsa byla rotována a byl vytvořen prostorový útvar. Dále byla stejným způsobem vytvořena druhá elipsa, která měla o 5 mm menší poloměr. Tímto zmenšením došlo k rozdílu, který bude představovat tloušťku stěny síně.

Druhá elipsa byla také převedena v prostorový útvar a odečtena od první větší elipsy, čímž jsme dostali požadovanou tloušťku stěny. Od elipsy byla pomocí roviny oddělena jedna polovina, byly zaobleny rohy a vytvořen válcový úchyt, který bude sloužit k přichycení ke středové části. Stejným způsobem, jenom s většími rozměry byly konstruovány také komory. Nakonec bylo do síně i komory vloženo vodorovné žebro, po kterém se bude pohybovat vačka. Protilehlé komory i síně jsou totožné, proto byla konstruována pouze jedna polovina, která bude vytištěna dvakrát. Bohužel tento tisk byl velmi náročný na tiskové podpěry, které musely podpírat obě síně i komory. Po těchto podpěrách zůstalo hodně drsných ploch, které musely být zahlazeny (Obrázek 5).



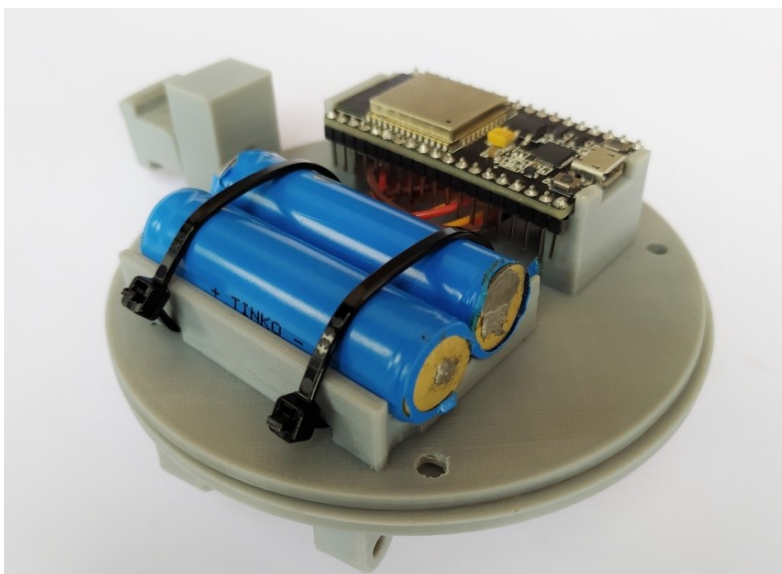
**Obrázek 5: Celoplošné síně se středovým žebrem**

Velkou změnou prošel úložný prostor středové části (Obrázek 6). Byl přizpůsoben k uložení zdroje v podobě dvou baterií Li-ion 3,7 V velikosti AA, řídicího modulu ESP-32 a také příslušné kabeláže. Byla proto vytvořena deska, která navazuje na spodní desku středové části a v ní bude uložena veškerá zmíněná elektronika. Tato deska kvůli úspoře místa má tloušťku pouze 2mm. Na ni se nachází blok s párem půlkruhových výřezů, do kterých budou uloženy obě baterie. Pomocí dvou stahovacích pásek o šířce 2 mm provlečených v drážkách pod tímto blokem budou baterie zajištěny.

Na protilehlé straně desky vznikl podstavec pro modul ESP-32. Podstavec je vyvýšen, aby bylo možné z boku pohodlně zapojit veškeré konektory, od servomotorů a napájení. V přední straně se nachází výřez, který umožňuje, připojení micro USB konektoru k modulu a jeho programování. Prostor, který vznikl pod podstavcem modulu ESP-32, může být využit k uložení přívodní kabeláže od servomotorů.

V zadní části desky je situován blok s dírou se závitem M4, který slouží ke spojení se stojánkem. Z důvodu vložení této nové desky, musely být upraveny všechny čtyři rozpěrky. Jejich délka byla zkrácena o 2 mm, což odpovídá tloušťce nové desky a její konce byly zúženy tak, aby nebránily žádným komponentům.

Nepatrné změny se dočkaly i horní a spodní deska. Mezi bloky pro uchycení servomotoru, závěsy a deskou byly vytvořeny rádiusy, které slouží ke zpevnění těchto spojů a zabraňují vylomení komponentu.



**Obrázek 6: Úložný prostor středové části**

V tomto stádiu byl model znovu otestován. Ke spojení klapky se závěsy na střevové části byla opět použita dřevěná kulatina a zpětný chod bez elastického obalu obstarávaly opět dvě gumičky.

Jediný problém, který se vyskytl, byla příliš drsná dosedací plocha vačky na vodorovném žebříku, která vznikla po tiskových podpěrách. Tento problém způsoboval zadrhávání vačky o klapky, proto musela být plocha zbroušena pomocí mini brusky DREMEL 3000 MK za použitím válcového brusného kotouče. Další úprava byla provedena pomocí pilníku a brusného papíru o zrnitosti 1000, 1500 a nakonec 2000, kterými byl povrch dokonale srovnán a vyhlazen. Po těchto úpravách už mechanismus běžel plynule a spolehlivě.

## **2. 3. Finální typ pohybového mechanismu**

Vylepšený druhý typ pohybového mechanismu se velmi dobře osvědčil, co se týče mechanických vlastností, plynulosti pohybu a spolehlivosti. Čím dál více se projevily nevýhody této konstrukce v oblasti řízení modelu, který přestával splňovat požadavky na přesné simulování srdečního cyklu a patologických jevů. Hlavním problémem bylo ovládání 360-ti stupňových servomotorů. Cyklus těchto servomotorů je řízen časovou šířkou signálu, který udává dobu a rychlost, po kterou se pohybují. Při nastavení určité délky časového impulsu uběhly oba servomotory rozdílnou vzdálenost. Rozdíl v této vzdálenosti nebyl velký, jednalo se o pár stupňů, což se může při 360-ti stupňovém cyklu zdát jako nepatrný problém. Bohužel při dalších otočkách se náskok jednoho ze servomotorů zvětšoval, a tím docházelo k rozhození srdečního cyklu.

Dále se vyskytly problémy při řízení servomotoru pomocí impulsu kardiostimulátoru, který byl v tomto stádiu simulován pomocí stlačení tlačítka. Při příchozím impulsu nebyl servomotor schopný dosáhnout takové rychlosti, jaké dosahoval při konstantním oběhu. Z toho vyplývalo, že počet otoček vačky za minutu, se nemohl rovnat tepové frekvenci reálného lidského srdce. V neposlední řadě toto řešení pohybového mechanismu ovládaného pomocí dvou vaček neposkytovalo tolik možností simulace patologických poruch. Bylo možné pouze jednu z vaček zastavit úplně, nebo naprogramovat její neřízené kmitání tam a zpět, a tímto simulovat fibrilaci obou síní, či obou komor. Nebylo ale



možné simulovat fibrilaci nebo selhání pouze jedné síně či komory.

Z těchto důvodů došlo k přepracování celého pohybového mechanismu. Jako pohonná jednotka celé konstrukce byly zvoleny čtyři servomotory MG90S. Tentokrát se jedná o verzi se sto osmdesáti stupňovým oběhem. Každé z těchto servomotorů bude ovládat svoji vlastní síň, či komoru. Tím bylo docíleno toho, že servomotory mohou být řízeny nezávisle na sobě a všechny mohou paralelně vykonávat rozdílné pohyby.

Uložení servomotorů bylo změněno ze svislé polohy na vodorovnou. Jejich upevnění zprostředkovávají čtyři bloky, rozmístěné na horní a spodní desce ve středu mechanismu. Kvůli menší velikosti bloků byly tentokrát zvoleny k přichycení křížové vruty M2 x 8. Na servomotory už nebude působit tak velká síla, jako při svislé poloze, a proto bloky mohou být kvůli úspoře místa menší. Toto zmenšení vyžaduje i použití již zmíněných kratších vrutů. Kabeláž servomotorů je provlečena přes díry o průměru 5 mm do středového prostoru.

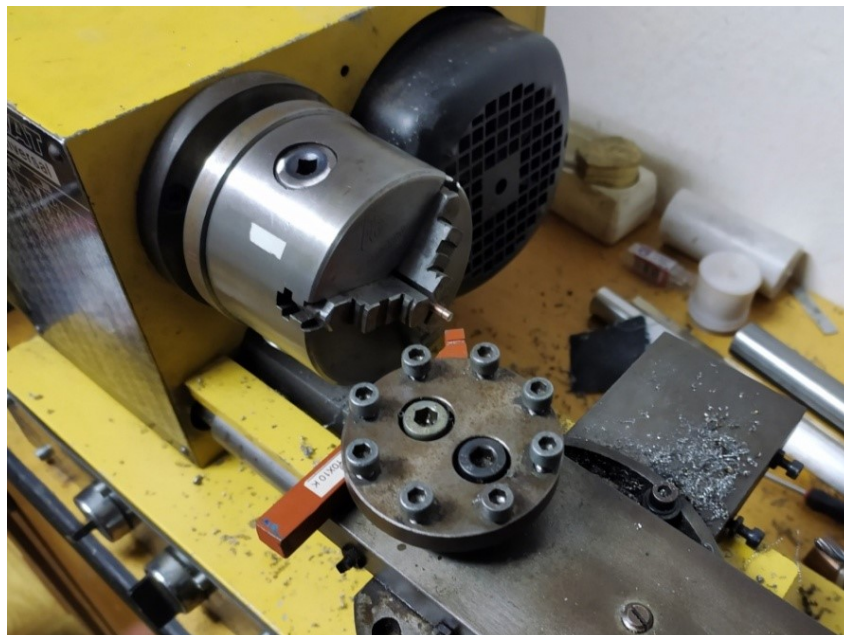
Na výstupní hřídel servomotorů je místo vačky nasazená originální plastová páka, která byla dodána v příslušenství. Dlouho bylo otázkou, jak dosáhnout přesné délky spojnice, mezi pákou servomotoru a jednotlivými klapkami. Nakonec byl tento problém vyřešen, výrobou této spojnice ze tří dílů (Obrázek 7). Na páku servomotoru je nasazena tištěná vidlička, která je k páce připevněna pomocí závlačky o průměru 0,8 mm, která je na obou koncích zahnutá tak, aby vidlička z páky nevypadla. V této vidličce byla podélně vytištěna díra o průměru 2,5 mm, která byla pomocí závitníku M3 přeměněna v metrický závit [3]. Do tohoto závitu je našroubována závitová tyč M3 a na jejím druhém konci je nasazena totožná vidlička. Pomocí zašroubovávání a vyšroubovávání závitové tyče do těchto vidliček můžeme snadno regulovat délku celé této spojnice. Všechny vidličky spojnice a držák tvaru T byly kvůli větší pevnosti při zatížení silou, kterou na ně působí servomotory, vytištěny z odolnějšího materiálu ABS [4].

Ze síní a komor bylo odstraněno žebro, po kterém se v minulosti pohybovala vačka. Spojnice servomotorů je ke klapkám přichycena pomocí držáku ve tvaru T. Držák je pomocí dvou šroubů M3 x 12 s imbusovou hlavou přichycen ke klapce, do které byly vyvrtány díry vrtákem o průměru 2,5 mm a poté přeměněny pomocí závitníků M3 v závit. K namontovanému držáku je vidlička přichycena a zajištěna, stejně jako na protější straně k páce servomotoru, pomocí závlačky.



**Obrázek 7: Přenos pohybu pomocí páky a spojnice**

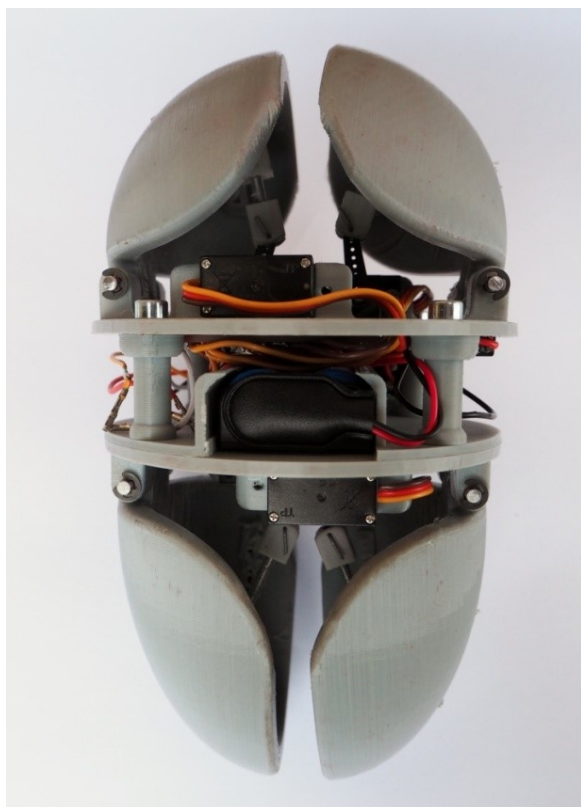
Zdokonalení se dočkaly také pojistné hřídele spojující klapky se závěsy na středových deskách. Tyto hřídele byly vyrobeny z mosazné kulatiny o průměru 3 mm. Hřídel má délku 42 mm. Z obou stran hřídele se nachází drážka o průměru 2,3 mm, do které je zasunutý třmenový pojistný kroužek, který zabraňuje vysunutí hřídele ze závěsů. Tyto hřídele byly vysoustruženy na soustruhu Hobbymat MD 65 (Obrázek 8).



**Obrázek 8: Soustružení pojistné hřídele**

Ze středové desky nesoucí elektronické komponenty byl odstraněn blok pro uložení baterií a držák modulu ESP-32. Bylo zakoupeno pouzdro pro dva Li-ion akumulátory, pro které byla vytvořena nová přihrádka. Po odpojení patentky, která bude zprostředkovávat přenos napětí na plošný spoj, je možné celé toto pouzdro jednoduše vysunout a akumulátory dobít, popřípadě vyměnit. Nová řídicí a napájecí deska je přišroubována k horní středové desce. V zadní straně středové části byl vytvořen blok s drážkou o rozměrech 30,3 x 3,3 mm, do které bude zasunuta nerezová část stojánku. Mimo této drážky se v bloku nově nachází otvor pro centrální vypínač a jack 3,5 mm.

Hotový mechanismus byl zkompleťován a osazen komponenty (Obrázek 9). Jako velmi účinné se ukázalo nastavování délky spojnice páky servomotoru a klapky, protože celý mechanismus mohl být seřízen tak, že všechny jeho klapky jsou při výchozí poloze co nejblíže u sebe a jsou mezi nimi minimální mezery.



**Obrázek 9: Sestavený finální typ pohybového mechanismu**

Později během nasazení elastického obalu se ukázalo, že držáky tvaru T byly na klapkách umístěny příliš blízko závěsu. To způsobovalo, že síly, kterými servomotory na klapky působí, nejsou dostatečně velké, aby elastický obal roztáhly. Držáky tvaru T byly postupně posouvány dál od středu otáčení, a tím hledána jejich ideální poloha (Obrázek 10). Po namontování držáků do nových pozic model fungoval bezchybně.



**Obrázek 10: Vyvrtané díry při posouvání držáku**



## 3. Elastický obal

Další kapitola popisující vývoj mého animatronického modelu srdce se týká výroby elastického obalu, který bude představovat samotný povrch lidského srdce. Výroba tohoto obalu byla poměrně náročná. Několik pokusů o tento obal se technicky nezdařilo, nebo nedosahovalo dostatečné kvality. Při konstrukci bylo využito různých materiálů a výrobních technologií.

### 3. 1. Tisk elastického obalu z pružného materiálu

Jako první metoda výroby elastického obalu byl zvolen 3D tisk. Tato metoda dokonale splňuje zadání mé bakalářské práce a dodala mnoho zkušeností a nových poznatků v oblasti tisku z elastických materiálů. Velkou výhodou bylo umožnění tohoto náročného tisku na tiskárně Trilab DeltiQ 2 na půdě Fakulty elektrotechniky a informatiky.

Mezi flexibilními materiály jsou nejpoužívanější tiskové filamenty vyrobené z termoplastického elastomeru. Hlavními zástupci jsou materiály TPE a TPU. Kromě tiskových filamentů se tyto materiály používají například k výrobě těsnění, hraček nebo měkkých částí elektrospotřebičů. Bylo potřeba zvolit materiál o ideální pružnosti. Čím je větší pružnost materiálů, tím hůř se z něj tiskne. Naopak při malé pružnosti by materiál nebyl dostatečně elastický a servomotory by nezvládly tento obal roztahovat. Nakonec byl vybrán materiál TPE88 červené barvy, který podle tabulek a videí hotových výrobků by mohl odpovídat požadavkům zvoleného tisku [7]. Barva tohoto filamentu je také příznivá pro tisk modelu lidského srdce.

Protože vymodelovat model lidského srdce v 3D programu je velmi časově náročné a mohlo by to být samotné téma bakalářské práce, soubor pro tisk modelu lidského srdce ve formátu STL byl stažen z internetového portálu Thingiverse.com. Otázkou už zůstávalo jen zvolení správného měřítka a nastavení tisku. Pro určení správného měřítka byl nakreslen prostorový objekt, který velikostně odpovídal připravenému pohybovému mechanismu. Objekt byl vložen do staženého modelu srdce, které bylo zvětšováno, dokud se do něj celý objekt s přehledem nevešel. Příprava na tisk proběhla opět v programu PrusaSlicer 2. 3. 0. s výplní, která byla kvůli větší pružnosti zvolena na deset procent. Při tomto tisku bylo nutno použít velké množství tiskových podpěr, které dobou tisku a spotřebou materiálu téměř převyšovaly samotný výrobek. V tomto případě však nebyla jiná možnost, jak se těmito podpěrám vyhnout.

I když se zvolený tiskový materiál zdál být vhodný pro tento model a dokonale odpovídal požadavkům, při tisku došlo k mnoha problémům. Při prvním pokusu se hned po několika vrstvách výrobek odlepil z tiskové podložky, proto při dalším pokusu byla na tiskovou podložku nalepena vrstva oboustranné lepicí pásky, která měla zajišťovat větší pevnost první vrstvy k podložce. Po zahájení tisku se tento problém zdál vyřešen. Brzy se však vyskytly další komplikace. Vytištěný výrobek se začal kroutit, a tím docházelo k znehodnocení tisku. Z těchto důvodů byl tisk zastaven, aby nedocházelo ke zbytečnému plýtvání materiálem. Povrch po odstranění tiskových podpěr byl velmi nerovný a vrásčitý. Vytištěný materiál byl analyzován a bylo zjištěno, že elastické vlastnosti materiálu nejsou pro výrobu obalu vhodné (Obrázek 11). Obal modelu byl příliš tuhý. Po těchto zkušenostech

bylo od metody 3D tisku upuštěno a k dalšímu pokusu již nedošlo.



**Obrázek 11: Vytisknutá část z materiálu TPE 88**

## **3. 2. Výroba lukoprenového odlitku pomocí lukoprenové formy**

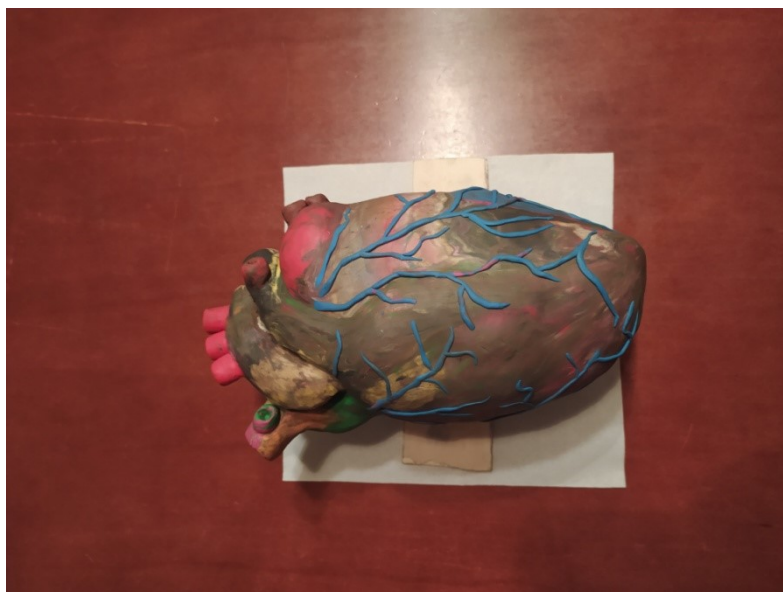
Po neúspěšném pokusu o 3D tisk obalu jsem se po vzoru mnoha dalších modelů lidských orgánů vydal cestou výroby elastického obalu srdce pomocí lukoprenové formy. Další návrh obalu srdce bude odlit také z tohoto materiálu. Lukopren je jeden z druhů silikonů. Používá se především na výrobu odlévacích forem, výrobě těsnění, elektroizolace, ale také výrobě samotných výrobků, jako například různých hraček a modelů.

Nejprve bylo potřeba vyrobit z extrudovaného polystyrénu těleso, které svým tvarem a velikostí odpovídá pohybovému mechanismu. Toto těleso bylo z polystyrenu vyřezáno nožem a vyhlazeno pomocí brusného papíru. Na zadní stranu polystyrenového tělesa bylo přišroubováno pomocí dvou hmoždinek a vrtů dřevěné prkénko, které bude sloužit k odkládání modelu a také jeho zavěšení při odlévání. Polystyrenové těleso bylo kvůli ochraně proti přilepení a poškození celé obaleno strečovou fólií (Obrázek 12).



**Obrázek 12: Polystyrénové těleso s dřevěným prkénkem**

Těleso bylo obaleno přibližně 5 mm vrstvou modelíny. Tloušťka této vrstvy bude odpovídat tloušťce elastického obalu. Z této hmoty byly vymodelovány také srdeční arterie tak, ať vymodelované srdce co nejvíce odpovídá reálnému (Obrázek 13).



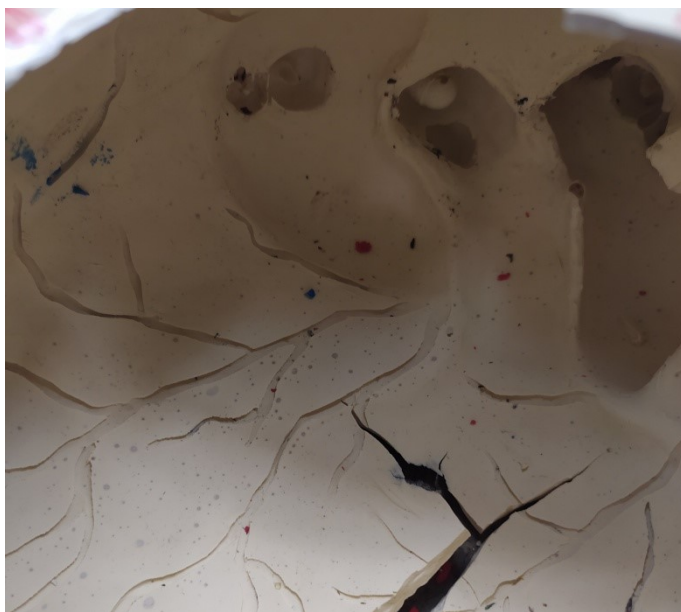
**Obrázek 13: Vymodelované srdce z modelíny**

Lukoprenů je hodně druhů. Liší se viskozitou, pevnostními a elastickými vlastnostmi, odolností vůči chemikáliím a okolním vlivům. Jako materiál k výrobě formy byl zvolen lukopren N 1522. Tento lukopren je univerzální a jeden z nejpoužívanějších k výrobě forem. Není ovšem vhodný k výrobě samotných modelů, kvůli jeho menší pevnosti v tahu. Ale na výrobu formy, při které je potřeba jeho velké množství, je ideální. K výrobě samotného odlitku obalu se jako nejlepší zdál lukopren N 5221. Tento materiál má dokonalé pevnostní vlastnosti v tahu, je pružný a vhodný ke tvarování malých detailů [8].

Pro odlití formy byla vyrobena krabice z kartonové lepenky, do které byl tento model vložen. Dno i stěny této krabice byly vystlány igelitovou folií, aby nedocházelo k průniku lukoprenu přes

lepenku. Z důvodu úspory materiálu byly rohy a prostory, do kterých srdce nezasahovalo, vyplněny polystyrénem. Lukopren byl smíchán s katalyzátorem, který slouží jako spouštěč tuhnutí materiálu, a touto směsí bylo srdce zalito [9].

Materiál byl ponechán 24 hodin tuhnout. Poté byla odstraněna lepenka, forma byla lehce naříznuta nožem a bylo z ní vyjmuto plastelínové srdce. Forma byla důkladně vyčištěna a několikrát vytřena parafínovým separátorem, který slouží k tomu, aby se odlitek formě nepřilepil (Obrázek 14). Z polystyrenového tělesa byla odstraněna veškerá plastelína, bylo očištěno a také natřeno separátorem. Při vyjmutí odlívaného srdce se začala ve formě šířit trhlinka, která byla opravena pomocí lukoprenu a lepicí pásky. Jinými prostředky než lukoprenem tento materiál lepit nelze.



**Obrázek 14: Vnitřní povrch lukoprenové formy**

Polystyrenové těleso bylo vloženo do formy. Byla připravena směs na odlití, kterou tvořil Lukopren N 5221 smíchaný s katalyzátorem. Do směsi byla přidána tónovací pasta, která materiálu dodá červenou barvu. Směs byla důkladně promíchána a vlita do formy. Odlévání bylo komplikované, kvůli velké hustotě směsi, která do formy špatně zatékala. Proto materiál musel být do formy tlačен pomocí tenkých nástrojů. Když se forma zdála být plná, polystyrenové těleso bylo zatlačeno co nejvíce dovnitř, aby materiál pod tlakem zatekl do všech záhybů. Poté byl znovu dolit chybějící lukopren a tento postup byl několikrát opakován.

Po ztvrdnutí materiálu byl odlitek vyjmut z formy. Bylo v plánu formu zachovat pro další odlitky. Kvůli velké těsnosti a malé pružnosti však musela být rozřezána na více částí (Obrázek 15). Hotový odlitek také nezůstal v celku. Téměř celá jeho zadní strana zůstala přilepena k formě a při demontáži musela být odtržena.



**Obrázek 15: Odlitek po rozebrání formy**

Přestože se odlitek nedochoval celý, byl nakonec opraven lukoprenem S 9780 dodávaným v tubě jako těsnící tmel. Pro dobarvení byla přidána červená tónovací pasta. Tímto lukoprenem byla dotvarována vytržená zadní stěna, vytmeleny drobné trhlinky a opraveny nedostatky na povrchu. Hotový obal byl nasazen na pohybový mechanismus. Přestože vzhledově splnil očekávání, jeho elastické vlastnosti nevyhovovaly funkci modelu. Velká pevnost lukoprenu N5221 způsobila, že servomotory neměly dostatek síly, aby tento obal roztáhly, a pohybovaly s ním pouze ve velmi omezené míře. Pohyby, které model v tomto obalu vykonával, neodpovídaly fyziologickým pohybům reálného srdce.

### **3. 3. Výroba elastického obalu z tekutého latexu**

Jako další možný výrobní materiál se jevil tekutý latex. Využívá se k výrobě karnevalových masek, otisků obličejů, končetin a podobných věcí vyžadujících pružný materiál. Tato substance se dá koupit přímo v červeném odstínu.

U výroby obalu srdce z latexu byly vyzkoušeny dva postupy.

První postup bylo nanášení několika vrstev latexu na model srdce pomocí štětce. Podle návodu se vrstvy mají nanášet v desetiminutových intervalech. Čím více vrstev nanese, tím pevnější a hrubší bude hotový výrobek. Tato metoda ale také nesplnila očekávání. Vrstvy byly velmi tenké, špatně na sebe přilínaly a ztékaly pryč z povrchu. Po nanesení deseti vrstev latexu, bylo docíleno pouze 0,5 mm široké skořepiny, která nebyla vhodná k plánovanému použití.

Jako další pokus byla vyzkoušena metoda zahuštění latexu pomocí hladké mouky a vymodelování skořepiny pomocí této směsi. Tekutý latex byl smíchán s hladkou moukou tak, aby vytvořil kašovitou hmotu. Ta byla postupně nanášena na polystyrenové těleso, které už bylo použito k výrobě lukoprenového modelu. Po zaschnutí materiálu byl vnitřek obalu vysypán hladkou moukou, aby nedocházelo k přilepení.

Hotový výrobek (Obrázek 16) měl tloušťku stěny přibližně 5 mm. Jeho elasticita odpovídala



požadavkům a po nasazení na pohybový mechanismus byla její roztažnost dostačující. V dalším kroku měly být z tohoto materiálu vymodelovány arterie a srdeční křivky, ale takto přesné modelování z tohoto materiálu nebylo možné. Hotový elastický obal připomínal lidské srdce pouze okrajově. Použitý materiál se deformoval a nedržel požadovaný tvar. Bylo rozhodnuto, že i tato metoda výroby obalu je pro mou práci nevhodná. Bylo nutné najít novou výrobní metodu.



Obrázek 16: Obal srdce vyrobený z tekutého latexu

### 3. 4. Lukoprenový obal vyrobený pomocí sádrové formy

Po selhání všech pokusů o výrobu elastického obalu, jsem se rozhodl vyzkoušet metodu s využitím materiálu lukopren S 9780. S jeho pomocí byl opraven původní lukoprenový obal. Tento materiál se prokázal jako pevný, ale velmi pružný. I když byla nanесena pouze tenká vrstva, materiál se netrhal, dokonale držel tvar a byl dostatečně roztažný.

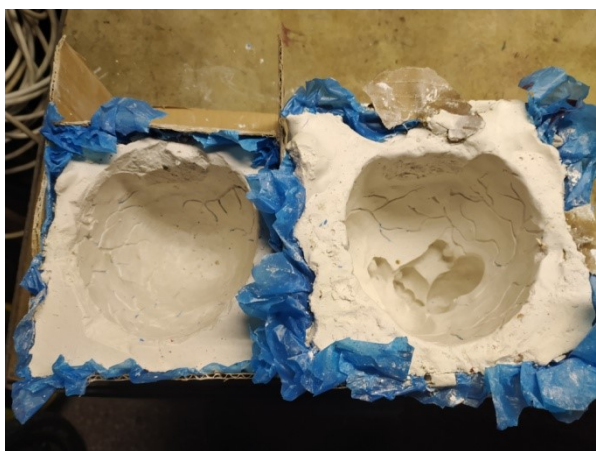
Otázkou bylo, jak tento materiál vytvarovat do podoby lidského srdce tak, aby šel snadno nasadit na pohybový mechanismus. Výroba jednodílné lukoprenové formy, kvůli velké spotřebě materiálu a nejistému výsledku, nepřipadala v úvahu. Bylo rozhodnuto jít cestou dvoudílné formy. A posléze slepení obalu ze dvou částí. Dvoudílná forma už nemusela být oproti svému předchůdci elastická, proto stačila k její výrobě obyčejná sádra.

První fáze výroby byla podobná výrobě formy z lukoprenu. Na polystyrenové těleso byla nanášena modelína a z ní vytvarován model v podobě reálného lidského srdce. Přínosným poznatkem z předchozích pokusů byl fakt, že více než elasticita materiálu je pro pohyb síní a komor důležitá vůle, která vznikne mezi obalem a klapkami. V případě že je obal příliš těsný, se servomotory nedokážou ani rozběhnout a zůstanou v základní poloze. V opačném případě, když je mezi obalem a klapkami dostatečná vůle, se servomotory začnou pohybovat až po rozběhu. Rozběh je náročný na dodání energie. Servomotory v pohybu narazí na obal, který jednodušeji roztáhnou. Z tohoto důvodu byla na polystyrenové těleso nanесena tlustší vrstva modelíny. Po nanесení tenčí vrstvy lukoprenu než je tloušťka modelíny, vznikne mezi obalem a klapkami požadovaná vůle.

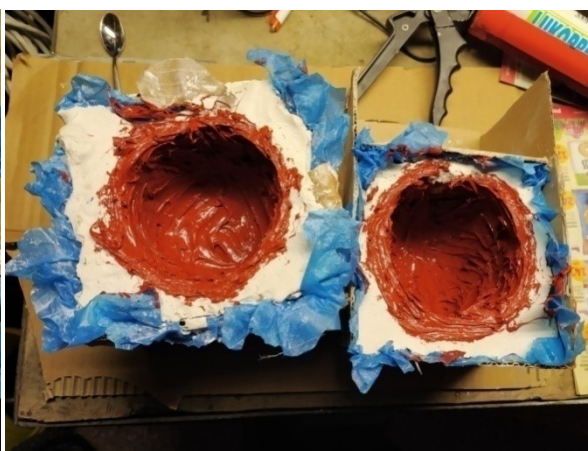
Krabice z kartonové lepenky tentokrát byla vyrobena menších rozměrů tak, aby se do ní vlezla polovina modelu ve vodorovné poloze. Krabice byla vylepena fólií, aby sádra nevytekla ven. Model srdce byl do této krabice usazen vzhůru nohama a jeho pozice byla vycentrována pomocí dřevěných

špejlí na střed. V tomto stádiu byl celý model zalitý řídce namíchanou sádrou. Sádra oproti lukoprenu velmi rychle schne a forma je proto brzy připravena. Model srdce z plastelíny byl i s polystyrenovým jádrem rozříznut nožem napůl. Zalitá část zůstala v sádře a druhá polovina byla uvolněna. Pro tuto uvolněnou polovinu byla vyrobena nová lepenková krabice a posléze byla také zalita sádrou. Polystyrenové jádro uvnitř sádrové formy bylo opatrně rozřezáno zalamovacím nožem a společně s plastelínou vydlabáno ven (Obrázek 17). Forma byla vyčištěna vodou a vylitá parafínovým separátorem, používaným u lukoprenové formy. Stejný postup byl zopakován také u druhé poloviny.

Lukopren byl vytlačen z tuby na papírovou podložku a byla do něj přimíchána červená tónovací pasta. Směs byla promíchána a pomocí lžice nanesena do formy. Nejprve byly zaplněny všechny otvory, které znázorňují arterie. Materiál byl do nich několikrát pod tlakem udusán tak, aby zaplnil všechny záhyby a nevznikly trhliny. Poté byl lukopren natřen i na celý povrch formy (Obrázek 18).



**Obrázek 17: Sádrové formy**



**Obrázek 18: Nanášení lukoprenu na formu**

Zaschlý lukoprenový obal byl opatrně vyjmut z formy, jemným kartáčem byly odstraněny zbytky sádry a byl umyt pod tekoucí vodou. Pomocí nože byly odstraněny nerovnosti u středové linie, které vznikly při nanášení lukoprenu do formy. Opatrným ořezáváním materiálu, byly zarovnány obě části a spoj připraven na lepení. Pohybový mechanismus byl v rámci ochrany před zašpiněním obalen několika vrstvy strečové fólie. Obě poloviny lukoprenového obalu byly nasazeny na pohybový mechanismus, zarovnány a pojištěny průhlednou lepicí páskou (Obrázek 19).



**Obrázek 19: Finální lepení obalu**

Spoj mezi oběma polovinami byl vyplněn lukoprenem, pomocí kterého byly také opraveny drobné praskliny a nerovnosti. Po zaschnutí materiálu byla sundána lepicí páska a model očištěn. Ze zadní strany byla nůžkami vystřižena díra, která bude sloužit pro nasazování obalu na pohybový mechanismus.

Obal byl nasazen na mechanismus a odzkoušen. Při prvním nasazení byla příliš malá vůle mezi obalem a klapkami a model neměl dostatečnou pohyblivost. Tento problém byl vyřešen vyplněním obalu stlačenou látkou a opatrným nahříváním horkovzdušnou pistolí. Tento proces byl několikrát opakován. Po vychladnutí a vyjmutí látky, se obal dostatečně roztáhnul a po nasazení na pohybový mechanismus byl dostatečně elastický a rozsah pohybu odpovídal reálnému lidskému srdci.



## 4. Elektronika a řízení

Podstatnou částí mé bakalářské práce, je ovládání servomotorů, jejich napájení a také napájení celé soustavy elektronických součástí. Bez těchto komponentů by model srdce byl pouze statický a nevykazoval žádný pohyb. Úkolem této soustavy je zpracovávat napětí dodané zdrojem, napájet z něj servomotory a zprostředkovávat jejich pohyb dle kódu, který byl naprogramován.

### 4. 1. Zdroj napětí

Již v počátcích mé bakalářské práce bylo rozhodnuto, že jako zdroj napětí poslouží dva Lithium-iontové akumulátory (Li-ion). Udávané jmenovité napětí jednoho článku je 3,6 V. Hodnota napětí při plném nabití přesahuje 4 V a při úplném vybití může klesnout až pod hranici 3 V. Výhodou těchto akumulátorů je jejich nízká hmotnost, velká kapacita a dlouhá životnost. Články Li-ion akumulátoru nevyžadují žádnou údržbu, a to z důvodu absence elektrolytu. Jejich použití usnadňuje také rychlé nabíjení, téměř žádný paměťový efekt a nízké samovybíjení [10].

Nabíjení zdroje probíhá po jednotlivých článcích za pomoci nabíjecího modulu na Li-ion akumulátory. Tento modul obsahující mikročip TP4056 lze pomocí vestavěného micro USB konektoru připojit například ke standardní nabíječce na mobilní telefony s výstupem 5 V. Proud, pomocí kterého je článek nabíjen, je 1 A. Během nabíjení jsou jednotlivé články vloženy do jednodílného držáku AA baterie (Obrázek 20), který je dvěma vodiči spojen s nabíjecím modulem.

V prvních fázích vývoje byly akumulátory často nahrazovány síťovým adapterem, který na svém výstupu má stejnosměrné napětí 5 V. Toto napětí je vhodné jak pro napájení servomotorů, tak modulu ESP-32. V případě že byly k napájení použity akumulátory s výstupním napětím okolo 8 V, byl použit lineární regulátor L7805CV, který toto napětí snižoval na 5 V [11].



Obrázek 20: Držák s Li-ion akumulátory

## 4. 2. Zapojení servomotorů a modulu ESP-32

Během testování prvních typů pohybového mechanismu bylo nutné nejdříve odzkoušet chod samotných servomotorů a přenášení pohybu pomocí vačky. K prozatímnímu řízení byla použita zakoupená vývojová deska ESP-32. Tato deska obsahuje například dvoujádrový procesor s pamětí 8 MB, integrovanou anténu, napájení, převodník USB logiky na TTL logiku (transistor-transistor-logic) [12].

O jeho napájení se staral pěti voltový pin USB konektoru, pomocí kterého byl také programován.

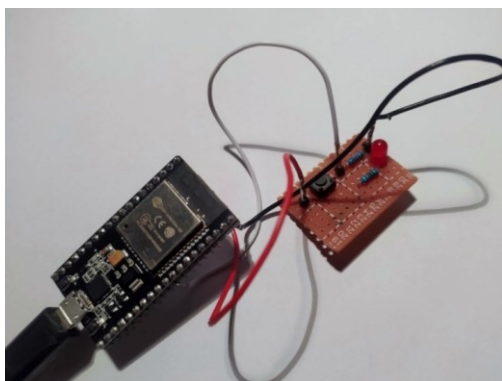
JR konektory servomotorů byly rozebrány a odstraněna jejich plastová část. Jednotlivé vodiče mohly být od sebe odděleny a poté zapojeny do různých poloh. Z univerzálního plošného spoje bylo po připájení header konektorů vytvořeno jednoduché pole pro spojení fázových a zemnicích vodičů servomotorů. Do jedné řady dohromady spojených konektorů byly zapojeny červené fázové vodiče a fázový vodič zdroje. V druhé řadě byly spojeny černé zemnicí vodiče servomotorů se zemnicím vodičem zdroje. Oranžové signálové vodiče servomotorů byly zapojeny na jednotlivé výstupní piny vývojové desky ESP-32. Na tomto zapojení bylo odzkoušeno řízení servomotorů a jednoduché srdeční cykly.

## 4. 3. Simulace impulsu kardiostimulátoru pomocí tlačítka

Jednou ze základních funkcí, kterou by měl model srdce splňovat, je interakce na signál kardiostimulátoru. Před návrhem mé vlastní řídicí desky bylo potřeba odzkoušet reakci servomotorů na podnět v podobě krátkého impulsu připojeného na desku ESP-32. Ta ovšem neumí zprostředkovat velmi krátký impuls kardiostimulátoru, proto byl nahrazen spínačem.

Napětí z výstupního pinu 3,3 V bylo přivedeno na spínač připájený v univerzálním plošném spoji. Po sepnutí spínače bylo toto napětí přivedeno na zvolený vstupní pin ESP-32. Výstupní konektor byl přes odpor o hodnotě 10 k $\Omega$  spojen se zemnicím vodičem přivedeným na vývojovou desku.

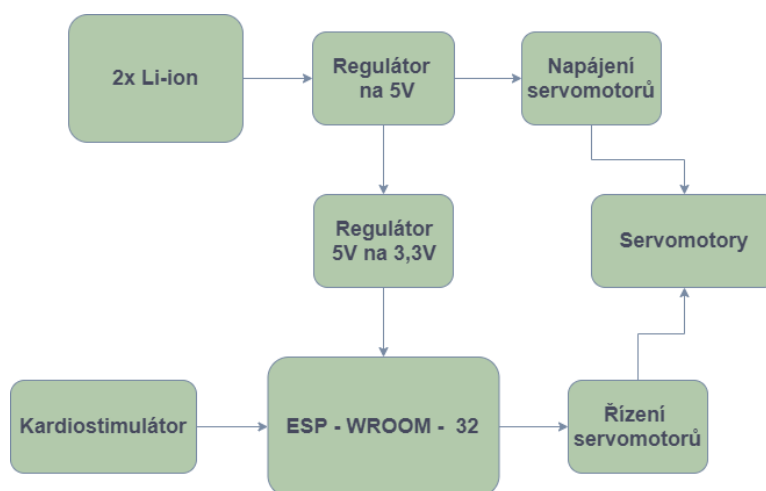
V případě, že se na vstupním pinu objevilo napětí připojené stisknutým spínačem, servomotory udělaly kroky simulující srdeční stah. Správná interakce desky ESP-32 na spínač, byla také ověřena pomocí led diody připájené na univerzální plošný spoj. V případě stisku spínače došlo podle nastavení k rozsvícení či blikání diody. Propojení modulu ESP-32 s osazeným univerzálním plošným spojem zobrazuje Obrázek 21.



Obrázek 21: Zapojení vývojové desky ESP-32 se spínačem

## 4. 4. Návrh řídicí a napájecí jednotky

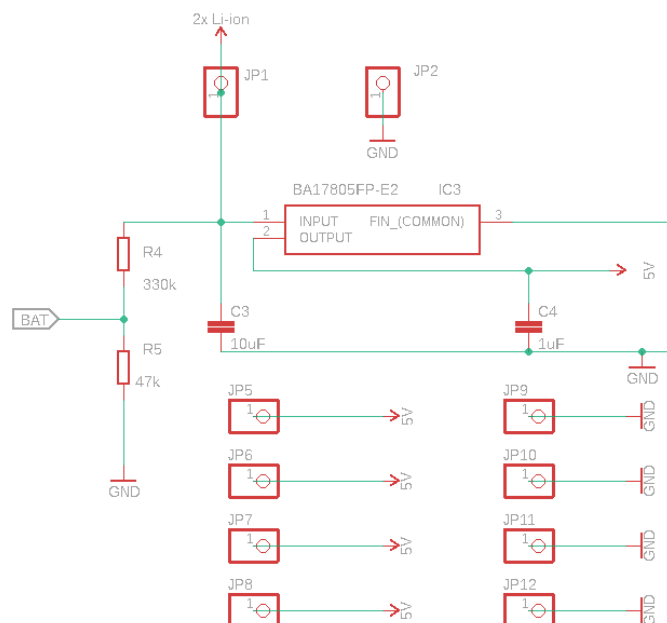
Pro plánované řízení a napájení modelu srdce je potřeba regulovat napětí Li-ion akumulátorů na hodnoty vhodné pro napájení servomotorů a ESP-32. Dále bylo nutno upravovat signál kardiostimulátoru pomocí komparátoru. Aby bylo vyhověno všem elektronickým požadavkům, které vývojová deska ESP-32 nebyla schopna uskutečnit, byla vyrobena vlastní řídicí a napájecí jednotka. Blokové schéma elektronického obvodu je uvedeno na Obrázku 22. Schéma zapojení a výkres dvouvrstvého plošného spoje byly navrženy v programu Autodesk Eagle 9. 6. 2.



Obrázek 22: Blokové schéma řídicí a napájecí jednotky

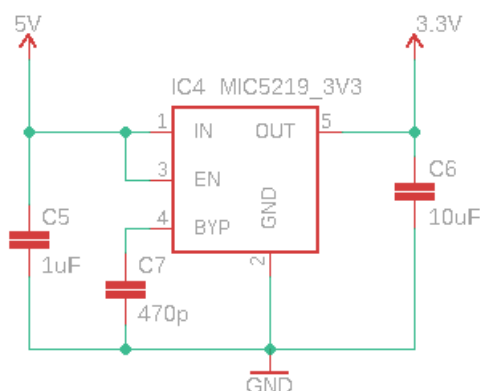
Napětí dvoučlánkového akumulátoru je přivedeno na vstup regulátoru BA 17805FP-E2, který snižuje toto napětí na hodnotu 5 V. Mezi vstup regulátoru a uzemnění je připojen stabilizační kondenzátor  $C_3$  o kapacitě 10  $\mu\text{F}$  a mezi výstupem regulátoru a uzemnění je kondenzátor  $C_4$  s kapacitou 1  $\mu\text{F}$ . Kondenzátory zabráňují oscilacím a jiným nežádoucím jevům. Výstupní napětí regulátoru je vyvedeno na piny označené 5-8, ze kterých jsou napájeny čtyři servomotory. Piny 9-12 přivádějí uzemnění pro servomotory.

Ke vstupu regulátoru jsou připojeny dva rezistory ( $R_4$ ,  $R_5$ ) o hodnotách 330  $\text{k}\Omega$  a 47  $\text{k}\Omega$  tvořící napěťový dělič. Dělič snižuje napětí podle poměru obou rezistorů na napětí, které je přijatelné pro vstupní pin A/D převodníku modulu ESP-32. Z tohoto pinu je možné vyčíst informaci o stavu nabití či vybití akumulátoru. Zapojení regulátoru BA 17805FP-E2 s pasivními prvky vyjadřuje Obrázek 23.



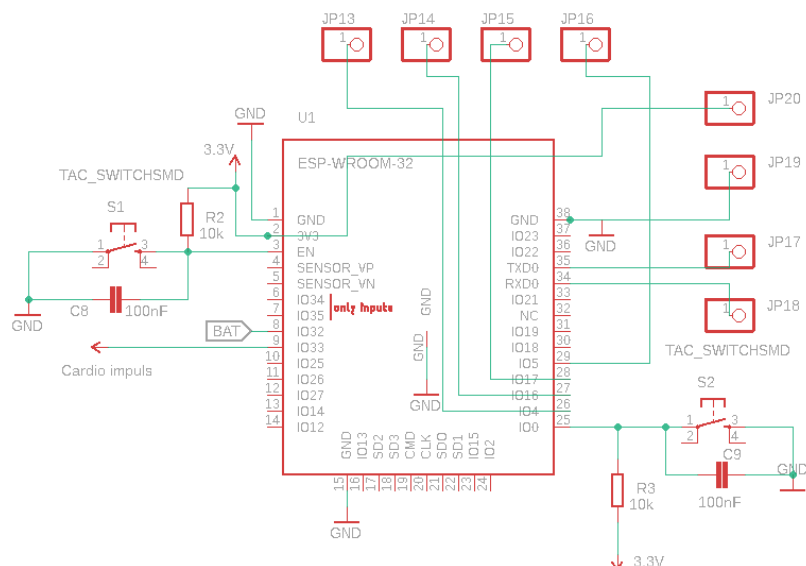
**Obrázek 23: Schéma zapojení 5 V regulátoru**

Dále je potřeba upravovat 5 V napětí na 3,3 V. Tento úkol zastává regulátor MIC5219\_3V3. Pomocí kondenzátorů  $C_5$  (1 uF),  $C_6$  (10 uF) a  $C_7$  (470 pF) je zajištěna stabilizace (Obrázek 24).



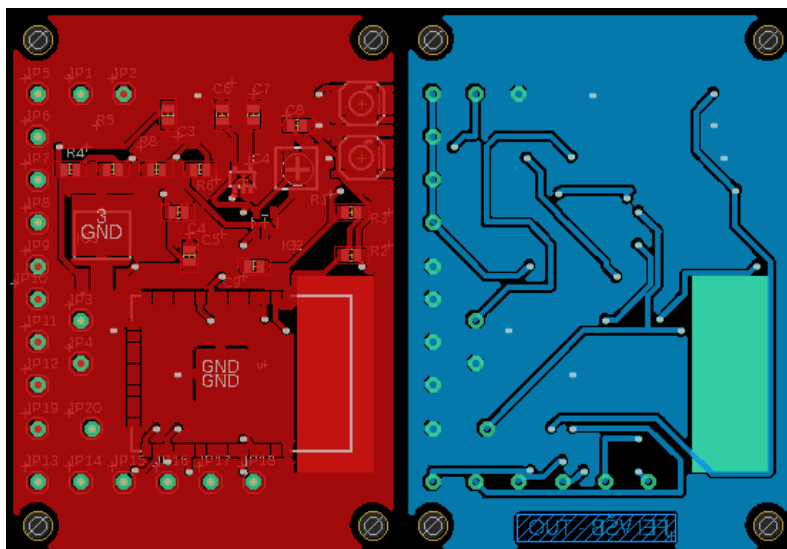
**Obrázek 24: Schéma zapojení 3,3 V regulátoru**

Jádrem této jednotky je samotný modul ESP-32. Tento modul je totožný s modulem, který je součástí vývojové desky ESP-32. Při nahrávání nového programu musí být přidrženo tlačítko, které uvede procesor do bootovacího režimu. Na vstupní pin IO0 je přivedeno přes pull-up rezistor  $R_3$  o hodnotě 10 k $\Omega$  napětí 3,3 V. Po stisknutí tlačítka dojde ke zkratování tohoto napětí přes kondenzátor  $C_9$  (100 nF) a napětí na pinu IO0 poklesne na 0 V. Tato hodnota představuje logickou nulu a umožní uvedení do bootovacího režimu. Resetování modulu probíhá za stisknutí tlačítka EN. Na pin EO je přivedeno přes druhý 10 k $\Omega$  pull-up rezistor značený  $R_2$  napětí 3,3 V. Po sepnutí spínače dojde opět ke zkratování napětí přes 100 nF kondenzátor  $C_8$ . Po tomto procesu se objeví na pinu EN 0 V a dojde k resetování modulu. Na výstupní piny 13-16 je vyveden signál pro řízení servomotorů. Piny 17-20 slouží k programování modulu ESP-32. Pin 20 je spojen s větví 3,3 V pro napájení modulu a pin 19 slouží k uzemnění. Na pin 17 je přiveden vysílací signál TXD0 a na pin 18 signál pro příjem dat RXD0. Obvod modulu ESP-32 je zobrazen na Obrázku 25.



Další plánovanou funkcí je řízení chodu servomotorů dle impulsu vyslaného kardiostimulátorem. V případě že by byl kardiostimulátor zapojen přímo na modul ESP 32, mohlo by dojít k jeho poškození v důsledku vysoké elektrické energie kardiostimulačního impulsu. Proto byl přidán obvod, který tento impuls upravuje (Obrázek 26). Výstupní signál kardiostimulátoru je přiveden do neinvertujícího vstupu operačního zesilovače OPA336N-3K. Operační zesilovač je zapojen jako komparátor. Porovnává hodnotu signálu kardiostimulátoru s hodnotou 3,3 V přivedenou na invertující vstup. Napěťovou korekci je možné řídit laditelným trimem, který snižuje referenční napětí přivedené na invertující vstup operačního zesilovače. Odpor reálného lidského srdce je simulován odporem  $R_8$  (500  $\Omega$ ) umístěným mezi stimulačními výstupy kardiostimulátoru. Rezistor  $R_6$  (1 M $\Omega$ ) odděluje kardiostimulátor od následující elektroniky.

Z hotového schématu byl vytvořen výkres desky plošného spoje. Jednotlivé součásti byly rozmístěny tak, aby bylo možné je ve dvou vrstvách propojit vodivými cestičkami, které se nesmí protínat. Musel být brán zřetel také na velikost desky, aby nebyla příliš velká a dala se snadno vpassovat do modelu. Navrhnutá deska byla zaslána k výrobě. Obrázek 27 zobrazuje horní a spodní stranu navržené desky plošného spoje.



Obrázek 27: Navržená deska plošného spoje horní a spodní strana

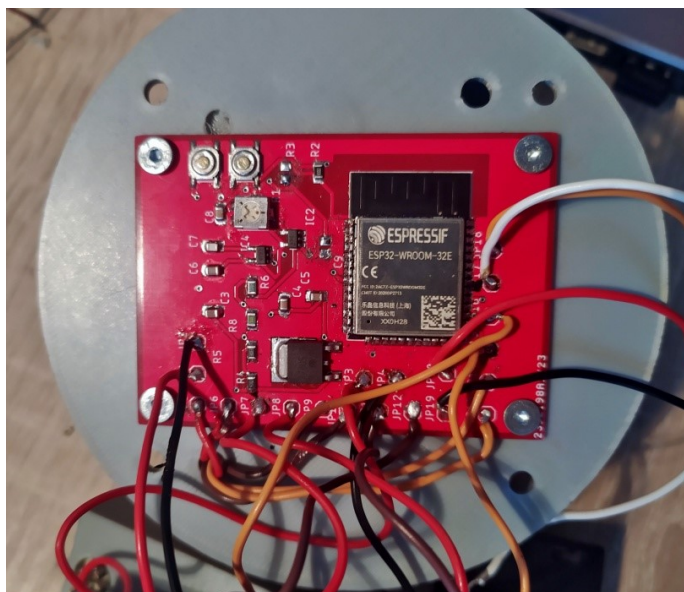
## 4. 5. Kompletace a testování řídicí a napájecí jednotky

Vyrobená deska byla zkompletována a pájena v laboratořích Fakulty elektrotechniky a informatiky Vysoké školy báňské (Obrázek 28).



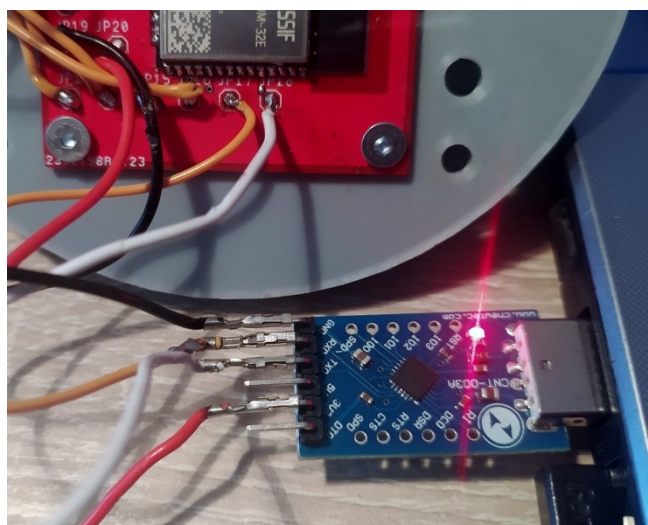
Obrázek 28: Sestavený plošný spoj

Hotová deska byla připevněna pomocí tří šroubů M3x4 k horní desce středové části pohybového mechanismu. Na desku byly napájeny vodiče vedoucí signál z programovacích pinů. Tyto vodiče byly připájeny k výstupním pinům. Na opačné straně vodiče se nachází JR konektor, vhodný k připojení k výstupnímu pinu převodníku. Z kabeláže servomotorů byly odstraněny koncové konektory, byly zkráceny na požadovanou délku a připájeny na příslušné piny plošného spoje. Kabeláž vedoucí signál z kardiostimulátoru byla připájena na piny 3 a 4. Opačná strana této kabeláže je připojena na 3,5 mm stereo jack, přes který bude kardiostimulátor připojen. Fázový vodič přivádějící napětí akumulátoru je spínán dvoupolohovým spínačem a přiveden na pin 1. Zemní vodič zdroje vede přímo na plošný spoj. Namontovaná deska s napájenou kabeláží je na Obrázku 29.



**Obrázek 29: Namontovaná řídicí deska s příslušnou kabeláží**

Kvůli absenci USB / TTL převodníku musel být použit externí modul (Obrázek 30) osazený mikročipem CP2104, který zprostředkoval komunikaci s USB portem. Během připojení a následného nahrávání kódu bylo využito 3,3 V napájení, kterým disponuje výstup převodníku. Vodič připojený na plošném spoji k pinu TXD0 byl připojen na převodníku k výstupu RXD. Signál RXD0 byl naopak připojen k výstupu TXD [13].



**Obrázek 30: Připojení pomocí USB / TTL převodníku**

Při testování modelu srdce došlo ke dvěma problémům. První použitý modul ESP-32 byl z důvodu zkratu pravděpodobně při pájení zničen. Musel být nahrazen novým modulem. Nastávající problém se týkal regulátoru BA 17805FP-E2. Přestože parametry regulátoru splňovaly požadavky obvodu a nebyl přetěžován větším proudem, než je jeho maximální výstupní proud, docházelo k přehřívání této součásti. Servomotory v režimech náročných na odběr proudu (například při roztahování elastického obalu) nedokázaly být dostatečně napájeny. Tento problém způsoboval cukání servomotorů o vysoké frekvenci, které připomínalo spíš fibrilaci než chod zdravého srdce.



Nahrazení regulátoru druhým regulátorem stejného typu nepomohlo vyřešit problémy s napájením. Jako východisko se ukázalo nahradit regulátor BA 17805FP-E2 regulátorem L7805CV. Tento regulátor ovšem byl větších rozměrů a nedal se připojit přímo do plošného spoje. Byl proto přišroubován mimo plošný spoj pomocí šroubu m 3x4. Výstupy regulátoru byly pomocí tří vodičů propojeny s plošným spojem. Ani při vyšší zátěži neprokazoval tento regulátor žádné problémy s napájením a dodáváním dostatečného množství proudu. Nedocházelo ani k přehřívání. Po dlouhodobém odzkoušení byl tento regulátor uznán vhodným k napájení plošného spoje.

## 4. 6. Řízení modelu srdce

Veškeré programy řízení srdce byly naprogramovány v aplikaci Arduino IDE 1. 8. 13. Pro komunikaci s modulem ESP-32 musel být stažen příslušný ovladač. Svůj ovladač vyžadovalo také ovládání servomotorů.

Při testování chodu servomotorů byl naprogramován kód, který pracoval ve dvou krocích. V prvním kroku posunul výstupní hřídel servomotorů z výchozí pozice 118 stupňů do koncové pozice 80 stupňů. V druhém kroku se vracely servomotory zpět do výchozí pozice. V případě že byl nastaven příliš malý chod servomotoru, nebyly srdeční pohyby zřetelné. V opačném případě servomotory při tak velkém chodu neuměly roztáhnout elastický obal. Jako nejlepší se ukázal již zmíněný rozsah od 118 do 80 stupňů. Přesná výchozí poloha jednotlivých síní či komor byla nastavena pomocí seřiditelných spojnic. Rychlost srdečního stahu a je nastavena pomocí funkce delay. Aby byl srdeční pohyb co nejpřesnější, byl nastaven tak, že se srdce pomalu roztahuje a rychle stahuje. Pomocí funkce delay je také řízena pomyslná tepová frekvence. Po spuštění řídicí jednotky, tento program automaticky naběhne a opakuje se, dokud jednotka není vypnuta.

K testování odezvy modelu na impuls kardiostimulátoru byl použit externí kardiostimulátor EPG 10B. Jedná se o kardiostimulátor s bifázickým průběhem. Šířka impulsu byla nastavena na 1 ms. Z důvodu menšího zatížení vstupu elektronického obvodu bylo výstupní napětí nastaveno na 1 mV a proud na 8 mA. Změnami frekvence nastavené na kardiostimulátoru je možné měnit frekvenci srdečního cyklu modelu. Řídicí kód je nastaven tak, že pokud je připojen kardiostimulátor, tak se model pohybuje dle nastavené kardiostimulační frekvence. Rozsah pohybu je opět nastaven od 118 do 80 stupňů. V případě, že je kardiostimulátor odpojen a na vstupní pin 33 není přiveden signál po dobu delší než 3,5 sekundy, model vykonává pohyb dle algoritmu s pevně nastavenou frekvencí. Minimální perioda, kterou je možné na kardiostimulátoru nastavit, jsou 3 sekundy. Proto je doba, po které se model začne řídit pevně nastaveným kódem 3,5 sekundy, aby nedocházelo k přepínání kódu při nízkých frekvencích kardiostimulátoru. V našem případě byl pevný kód nastaven s menším rozsahem (od 118 stupňů do 100 stupňů) a vysokou frekvencí. Bez připojeného kardiostimulátoru rychlý kmitavý chod modelu simuluje fibrilaci srdce, která je po připojení kardiostimulátoru přeměněna na plynulý chod.



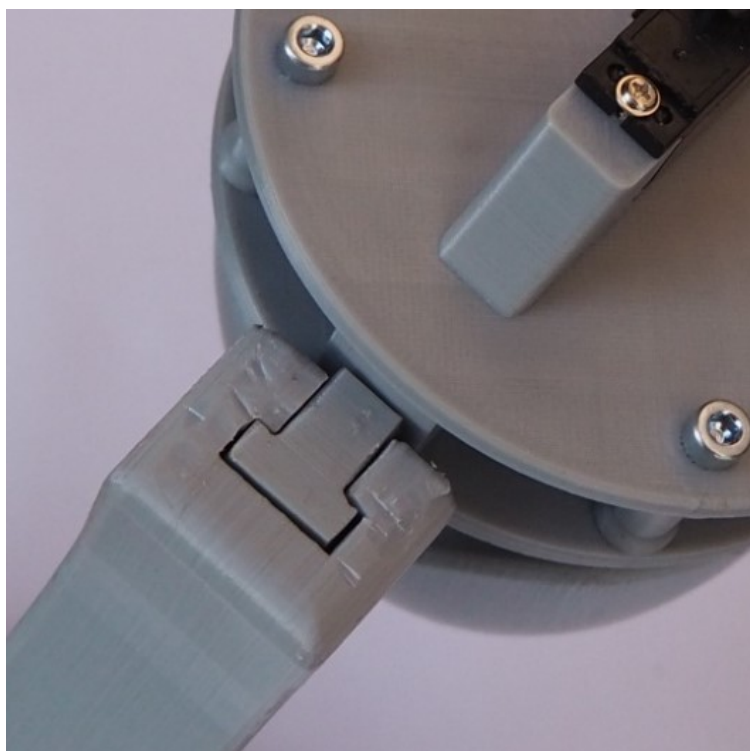
## 5. Stojánek

Poslední částí mé bakalářské práce je výroba stojánku, na kterém bude model srdce uložen. Tento stojánek slouží především k prezentaci modelu, jeho vystavování. Zabraňuje případnému pádu, či poškození.

### 5. 1. Tištěný stojánek

První typ stojánku byl navržen pro tisk na 3D tiskárně. Výška tohoto stojánku je 180 mm, šířka 30 mm a tloušťka 5 mm. Na vrcholu tohoto stojánku se nachází jeho hlava, do které je zasazen samotný model. V hlavě se nachází drážka tvaru T, do které se zasouvá protikus stejného tvaru přišroubovaný do bloku v zadní části středové části pohybového mechanismu (Obrázek 31). Mezi drážkou a protikusem je ze všech stran vůle 0,2 mm, která umožňuje snadné vložení protikusu do hlavy. Spodní strana stojánku plynule přechází do vodorovné roviny. K upevnění k plánované dřevěné desce slouží dvě díry pro vruty o průměru 4 mm.

Stojánek byl kvůli větší pevnosti vytištěn z materiálu ABS. Po nasazení modelu srdce docházelo k výraznému prohnutí tohoto stojánku. Váha zkompletovaného modelu srdce byla příliš velká, aby jí tento stojánek unesl a zůstal ve zpřímené poloze. Srdce po nasazení bylo nakloněno směrem dolů a srdeční pohyby byly méně viditelné.



Obrázek 31: Připojení k tištěnému stojánku

## 5. 2. Nerezový stojánek

Z důvodu lepších pevnostních vlastností byla k výrobě druhého stojánku použita nerezová ocel. Plochý profil o rozměrech 30 x 3 mm byl mechanicky ohnut do požadovaného tvaru tak, aby bylo umožněno jednoduché nasazení modelu a docíleno jeho rovné polohy. Po vytvarování byl nerezový profil zkrácen, aby dosahoval zvolené výšky 220 mm. Oproti svému předchůdci tento nerezový stojánek nedisponoval hlavou pro nasazení modelu srdce a model se nasazuje přímo na nerezový plochý profil, který je zasunut do drážky v bloku středové části pohybového mechanismu.

Pomocí mini brusky DREMEL 3000 MK byla zbroušena horní vrstva nerezové oceli a vybroušeny veškeré nerovnosti, které vznikly při ohýbání. Dále byl stojánek broušen brusným papírem o zrnitosti 1000, 1500 a 2000. Nakonec byl pomocí látkového leštícího kotouče dodán nerezové oceli zrcadlový lesk.

Jako spodní vodorovná část stojánku byla použita buková deska o rozměrech 200 x 150 x 40 mm. Hrany desky byly zabroušeny pomocí brusného papíru o zrnitosti 500, 1000, 1500 a 2000. Na horní straně byl vygravírován název bakalářské práce a jméno autora. Ke gravírování byl použit laserový plotr CO2 KH1490 (Obrázek 32).



Obrázek 32: Gravírování

Ve spodní části byla dlátem vyhloubena drážka pro upevnění nerezové části stojánku. Do spodní části nerezového profilu byly vyvrtány tři díry o průměru 4 mm. Třemi křížovými vruty M3 x 30 byla nerezová část pevně spojena s bukovou deskou a stojánek zkompletován. Kompletní stojánek s modelem srdce je zobrazen na Obrázku 33.



Obrázek 33: Model s nerezovým stojánkem

# Závěr

Cílem bakalářské práce byla konstrukce a návrh animatronického modelu srdce. Model může sloužit jako vyučovací pomůcka k simulaci srdečního cyklu a patologií, popřípadě ukázky interakci na vnější podmět, například impulsu kardiostimulátoru.

V první části práce byla uvedena základní problematika srdečního cyklu. Byly rozebrány výrobní metody a technologie, které byly při výrobě použity. Model byl rozdělen na části, ze kterých se skládá, a popsána jejich funkce a význam.

Jako první byl konstruován a vyráběn pohybový mechanismus, který slouží jako opora modelu a zprostředkovatel pohybu. Postupně byly navrženy a sestaveny celkem tři typy pohybového mechanismu. První typ byl primárně určen k odzkoušení principu přenosu pohybu pomocí oboustranné vačky nasazené na výstupní hřídel servomotoru s oběhem 360 stupňů. Po zhodnocení, že tento přenos je vyhovující, byl konstruován druhý typ pohybového mechanismu. Tento typ byl zdokonalen a osazen celoplošnými komorami. Později se však ukázalo, že servomotory s 360-ti stupňovým oběhem nejsou vhodné k pohonu mého modelu z důvodu omezených možností programování a řízení. Byl sestaven finální typ pohybového mechanismu, který je osazen čtyřmi servomotory o oběhu 180 stupňů a přímočarým přenosem pohybu. Tento typ byl zvolen jako nejvhodnější k použití k pohonu modelu srdce.

Dalším krokem byla výroba elastického obalu. Tisk obalu na 3D tiskárně se nezdařil. Po analýze pružnosti vytištěného materiálu bylo rozhodnuto, že tento materiál je z důvodu malé roztážitelnosti nevhodný. Následující pokus o výrobu obalu jako odlitku z lukoprenu odlitého do lukoprenové formy se také nepovedl. Odlitek byl příliš pevný a servomotory si nedokázaly s jeho tuhostí poradit. Selhal také pokus o obal vyráběný z tekutého latexu. Jako nejlepší metoda se ukázala výroba dvoudílné sádrové formy a nanášení lukoprenu na tuto formu. Tento model je dostatečně pružný a nejvíce připomínal vzhled reálného lidského srdce.

Řízení modelu v prvních fázích zprostředkovávala vývojová deska ESP-32. Protože toto řešení mělo pouze omezený rozsah funkcí a nedokázalo splňovat veškeré požadavky, byla navržena vlastní řídicí a napájecí jednotka. Plošný spoj této jednotky byl osazen především modulem ESP-32, ale také dalšími komponenty, jako jsou regulátory napětí, operační zesilovač či pasivní prvky. Po kompletaci plošného spoje a jeho umístění do modelu byla testována jeho funkčnost, která odpovídala všem požadavkům. Řídicí jednotka byla naprogramována a model byl odzkoušen v různých režimech chodu.

K uložení modelu byl vyroben stojánek, skládající se z nerezové části a dřevěné části, na které je vygravírovaný název práce.

Výroba a konstrukce modelu si vyžádala mnoho času a spotřebovaného materiálu. Při 3D tisku bylo použito 535 g tiskového filamentu, což je přibližně 177 metrů. Celkem tisk zabral přes 31 hodin čistého času. Výroba elastického obalu si vyžádala dodání 4,3 kg lukoprenu různých druhů a 4,5 kg sádry. Mimo jiné bylo spotřebováno mnoho šroubů, nerezového a mosazného materiálu.

I přes veškeré problémy a velkou spotřebu materiálu, bylo dosaženo velmi dobrých výsledků. Bylo vyzkoušeno několik nových postupů a poznatků, které mohou být uplatněny při případné výrobě dalších modelů.

# Literatura

- [1] SRDCE. *ELUC* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/200>
- [2] Srdce: struktura a funkce. *NZIP.CZ* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://www.nzip.cz/clanek/912-srdce-struktura-a-funkce>
- [3] METRICKÝ ZÁVIT - stoupání. *E-konstrukter* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/metricky-zavit-stoupani>
- [4] KADLEC, Martin. *Přehled materiálů pro 3D tisk* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://mk-eshop.cz/blog/post/8-prehled-materialu-pro-3d-tisk>
- [5] Materiály. *Help.prusa3d* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: [https://help.prusa3d.com/cs/materials#\\_ga=2.250620096.798673486.1619122095-1677055671.1606926684](https://help.prusa3d.com/cs/materials#_ga=2.250620096.798673486.1619122095-1677055671.1606926684)
- [6] MG90S – Metal Gear Micro Servo Motor. *Components101* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://components101.com/motors/mg90s-metal-gear-servo-motor>
- [7] Flexibilní materiály pro 3D tisk - čím jsou výjimečné. *MATERIALPRO 3D* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/flex-test/>
- [8] Silikonové formy. *Barvárna* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://eshop.barvarna.cz/lukopren-na-formy>
- [9] Návod na výrobu silikonových forem - FOTOSERIÁLY. *Lučební závady Kolín* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://www.lucebni.cz/cs/85-navody-na-vyrobu-silikonovych-forem-fotoserialy>
- [10] Li-ion baterie výhody. *Fyzika.okhelp* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://fyzika.okhelp.cz/baterie/lithiove-baterie-vyhody.php>
- [11] Regulátor napětí 7805. *Riverglennapts* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://riverglennapts.com/cs/current-voltage/234-voltage-regulator-7805.html>
- [12] ESP-32S, 2.4GHz Dual-Mode, WiFi+Bluetooth. *GM electronic* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/esp32-esp-32s-2-4ghz-dual-mode-wifi-bluetooth#product-detail>
- [13] Použití převodníku USB – TTL UART. *Tajned*. [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <http://www.tajned.cz/2015/03/pouziti-prevodniku-usb-uart/>

# Elektronické přílohy

